بررسی تأثیر مشخصّات پوشان بر حفره‌های داخلی در قطعات ریختگی چدنی تولیدی به‌روش ریخته‌گری با مدل از بین رونده*

عیسی امینی[۱] جعفر خلیل علافی[۲] رضا چاره خواه[۳] زهرا معروفی[٤]

چکیده

*در این تحقیق، تأثیر مشخصّات پوشان شامل نوع، گران‌روی و ضخامت آن بر روی مدل‌های اسفنجی، دما و زمان خشک شدن مدل‌های پوشان‌دهی شده در کوره‌ی خشک‌کن، بر تشکیل حفره‌های داخلی در قطعات ریختگی چدنی تولید شده به‌روش ریخته‌گری با مدل از بین رونده بررسی شده است. به‌منظور پیش بینی حفره‌های داخلی در قطعات، مدل‌سازی توسط نرم‌افزار طرّاحی آزمایش **Design-Expert** انجام گرفت و در نهایت، مقادیر بهینه‌ی هر مشخصه برای کمینه کردن تعداد حفره‌ها در قطعات تعیین شدند. نتایج آزمایش‌ها بیان‌گر افزایش حفره‌های داخلی با افزایش دمای کوره و کاهش آن‌ها با افزایش گران‌روی و ضخامت پوشان بودند. این در حالی است که پوشان A دارای حفره‌های داخلی بیش‌تری نسبت به پوشان B بود. افزون بر این، مشخص شد که در دمای بالای خشک شدن (٦٠ °C) و با افزایش زمان خشک شدن، حفره‌های داخلی افزایش و در دمای پایین خشک شدن (٤٠°C) و با افزایش زمان خشک شدن، حفره‌های داخلی کاهش می‌یابند. از طرف دیگر، در گران‌روی بیشینه، حفره‌های داخلی با کاهش زمان خشک شدن افزایش یافتند، در حالی‌که در گران‌روی کمینه، حفره‌های داخلی با افزایش زمان خشک شدن بیش‌تر شدند.*

واژه‌های کلیدی ریخته‌گری با مدل از بین رونده، پوشان، بهینه‌سازی، مدل‌سازی، حفره‌های داخلی، طرّاحی آزمایش، مدل اسفنجی، چدن خاکستری

Study of Effective Parameters of Coating on Internal Pores in Cast Iron Parts Produced by Lost-Foam Casting

E. Amini J. Khalil Allafi R. Charehkhah Z. Maroofi

Abstract

In this study, the effects of parameters including the type, viscosity and thickness of the coating applied on the foam patterns, drying temperature and drying time of the coated patterns inside the drying oven on the internal pores in cast iron parts produced by Lost-Foam casting were examined. In order to predict the presence of internal pores in the casting parts, DESIGN-EXPERT modeling software was used, and finally, the optimal value of each parameter was determined in order to minimize the number of pores in the casting parts. The results showed that the number of internal pores increases with an increase in drying temperature, and decreases with increasing coating's viscosity and thickness. However, the coating type A showed more internal pores compared to the coating type B. Moreover, internal pores in high drying temperature (60 °C) case increased with increasing drying time, whereas for the case where a low drying temperature (40 °C) was used, pores decreased with an increase in the drying time. On the other hand, internal pores for the high coating's viscosity case increased with derceasing the drying time, however, internal pores increased as the drying time increased for the case of low coating's viscosity.

Key Words Lost-Foam Casting, Coating, Optimization, Modeling, Internal Pores, Design of Experiment, Foam Model, Gray Cast Iron.

---

* نسخه‌ی نخست مقاله در تاریخ ۹۰/۱۰/۱۱ و نسخه‌ی پایانی آن در تاریخ ۹۱/۹/۲٦ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته و فراوری مواد معدنی، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

(۲) نویسنده‌ی مسئول: دانشیار، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته و فراوری مواد معدنی، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

(۳) دانشجوی کارشناسی ارشد، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته و فراوری مواد معدنی، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

(٤) دانشجوی کارشناسی ارشد، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته و فراوری مواد معدنی، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

مقدمه

در فرایند ریخته‌گری با مدل از بین رونـده ابتـدا مدلی به‌شکل قطعه‌ی مورد نظر از جنس اسفنج (یا هـر ماده‌ی مناسب دیگر) تهیه می‌شود و بـا غوطـه‌وری آن در یک ماده‌ی پوشان، روکش سرامیکی ایجاد می‌شـود و سپس درون ماسه‌ی خشک قالب‌گیری مـی‌شـود. در این روش قالب‌گیری، برای ایجـاد حفـره‌هـای داخلـی قطعه (بر خلاف روش‌های قالب‌گیری بـا ماسـه‌ی تـر) نیازی به استفاده از ماهیچه نیست. پس از قالب‌گیری و با ریختن مذاب درون قالب، اسفنج تبخیر شده و مذاب جای آن را می‌گیرد و در نهایت، قطعه‌ی نهـایی تولیـد می‌شود [1,2].

ریخته‌گری با مدل از بین رونده دارای مزیت‌های بسیار زیادی در مقایسه بـا روش‌هـای ریختـه‌گـری بـا ماسه‌ی تر می‌باشـد. بـا ایـن‌حـال، هماننـد هـر فراینـد دیگری محدودیت‌هایی نیـز دارد، بـا ایـن تفـاوت کـه مزیت‌های فنی این روش از محدودیت‌های آن برتـری دارند. کاهش تعداد متغیرهای مؤثر در فراینـد، کیفیـت سطحی بهتر قطعه، بهبود دقّت ابعادی قطعـه و کـاهش هزینه‌های ماشین‌کاری، عدم نیاز به مـواد افزودنـی بـه ماسه، حذف ماهیچه، انعطاف‌پذیری بسیار در طراحـی، و محـیط کارگـاهی تمیزتـر و کـم‌صـداتـر از جملـه مزیت‌های فنی این فناوری می‌باشند [1,2].

مزیـت‌هـای بـه‌کـارگیری ایـن فنـاوری از نظـر اقتصـادی نیـز اهمیـت دارنـد. کـاهش هزینـه‌هـای سرمایه‌گذاری، کاهش فضای مورد نیاز برای تجهیزات، هزینه‌ی کم‌تـر نگـه‌داری ماشـین آلات، میـزان کـم‌تـر ضایعات قطعات، امکان کاهش وزن قطعات و افـزایش بهره‌ی ریخته‌گری از مزایـای اسـتفاده از ایـن فنـاوری هستند. اگر قطعه‌ی مناسبی برای ریختـه‌گـری بـا ایـن فناوری انتخاب شود، قیمت تمام شده‌ی محصول ۲۰ تا ۶۰ درصد کاهش می‌یابـد. منظـور از قطعـه‌ی مناسـب قطعه‌ی پیچیده و قطعه‌ای است که بیش از یک ماهیچه در آن به‌کار گرفته شده باشد. افزون بر این، قطعه‌ای که در روش‌های متداول تولید آن نسبت وزن ماهیچـه بـه وزن فلز بالا باشد نیز در ایـن مجموعـه قـرار دارد. در مواردی که ریخته‌گری عمودی نتایج بهتری می‌دهـد و یا برای قطعاتی که به‌دلیل سطح جدایش پیچیده یا نوع آلیاژ هزینه‌ی تمیز کاری زیاد اسـت نیـز از ایـن روش استفاده می‌شود [1,3].

پوشان مورد استفاده در این فرایند نقش مهمی را در این تکنولوژی بر عهده دارد. دلیل عدم بـه‌کـارگیری این فنـاوری در فراینـد ریختـه‌گـری در طـول سـالیان طولانی بعد از کشف آن توسط شرویر در سـال ۱۹۵۸، عدم توسـعه‌ی پوشـان مناسـب بـرای آن بـوده اسـت. پوشان‌های این فرایند باید دارای خصوصـیات ویـژه‌ای باشند. پوشان پـس از اعمـال بـر روی مـدل و خشـک شدن آن بایـد قابلیّـت تحمّـل وزن ماسـه و نیروهـای سایشی حاصل از فلز مذاب را داشته باشـد. افـزون بـر این، دیرگدازی و شوک‌پـذیری مناسـب را در دماهـای بالای فلز مذاب داشته و نفوذپذیری لازم برای خـروج گازهای حاصل از تجزیه‌ی اسفنج را نیز داشـته باشـد. پوشان استفاده شده در این فرایند معمولاً حـاوی مـواد دیرگداز، حامل، چسـب، عامـل تعلیـق، عامـل پخـش کننده‌ی ذرات، مواد تیکسوتروپ (thixotropic) و چند افزودنی دیگر می‌باشـد. ایـن ترکیـب تقریبـاً شـبیه بـه پوشش‌های دیرگدازی اسـت کـه بـرای پوشـش دهـی قالب و ماهیچه در انواع روش‌های مرسوم ریخته‌گـری استفاده می‌شـود. تفـاوت اساسـی ایـن پوشـش‌هـا بـا پوشان‌های فناوری ریخته‌گری با مدل از بین رونـده در انـدازه و نسـبت اجـزای مـورد اسـتفاده در آنهاسـت. دیرگداز بودن پوشان مانع از نفوذ مذاب به ماسه شده و از ماسه‌سوزی جلوگیری می‌کند. به‌این ترتیب، کیفیّـت سطحی قطعات بهبود می‌یابد. معمولاً از یک یا ترکیبـی

از چند دیرگداز مانند سیلیس، آلومینا، زیرکونیا و کرومیت استفاده می‌شود تا خاصیّت عایق حرارتی مطلوبی به‌دست آید. مخلوط کردن این دیرگدازها تأثیر زیادی بر نفوذپذیری پوشان دارد. دیرگداز مورد استفاده برای تهیه‌ی پوشان بر اساس نوع فلز، دمای ذوب‌ریزی، ضخامت قطعه‌ی ریخته شده و اندازه و شکل ماسه‌ی بدون چسب پیرامون مدل انتخاب می‌شود [4-6].

پوشان مورد استفاده در این فرایند، کنترل کننده‌ی اکثر عیب‌های ریختگی قطعات می‌باشد، به‌گونه‌ای که کوچک‌ترین تغییر در مشخصّات آن موجب تغییر کیفیّت در قطعات نهایی می‌شود. از میان مشخصّات پوشان، نفوذپذیری به‌دلیل کنترل خروج محصولات حاصل از تجزیه‌ی مدل اسفنجی، مهم‌ترین عامل در کنترل عیب‌های ریختگی می‌باشد و باید به دقّت کنترل شود. به قابلیّت پوشان در خروج محصولات حاصل از تجزیه‌ی اسفنج، نفوذپذیری (permability) گفته می‌شود. مهم‌ترین عواملی که بر روی نفوذپذیری پوشان مؤثرند عبارتند از نوع پوشان از نظر جنس و ابعاد مواد جامد دیرگداز آن، ضخامت پوشان بر روی مدل‌های اسفنجی و گرانروی پوشان. نکته‌ی مهم در مورد نفوذپذیری پوشان، به‌دست آوردن مقدار بهینه‌ی آن برای هر قطعه‌ی خاص می‌باشد. اگر نفوذپذیری پوشان بیش از مقدار بهینه باشد، گازهای حاصل از تجزیه‌ی مدل اسفنجی به‌سرعت وارد ماسه‌ی ریخته‌گری می‌شود و در این حالت، به‌دلیل افت فشار در فضای بین مذاب فلز و اسفنج در حال ذوب، پوشان تحمّل وزن ماسه را نداشته و ماسه به درون قالب وارد می‌شود. در نتیجه‌ی این حالت، قطعه‌ای سوراخ‌دار یا قطعه‌ای با سطوح چین‌خورده ایجاد می‌شود. در بدترین حالت، قطعه‌ای بی‌شکل به‌دست می‌آید. در صورتی‌که نفوذپذیری کم‌تر از مقدار بهینه باشد، فشار گاز در فضای خالی تا جایی که بر فشار متالواستاتیکی غلبه کند، بالا می‌رود. به‌دلیل افزایش فشار در پشت پوشان و اعمال نیرو به آن، برآمدگی‌هایی بر روی سطح قطعه ایجاد می‌شوند. مشکل بعدی از حرکت ناپایدار مذاب ناشی می‌شود، زیرا گازها به‌طور غیرپیوسته و شدید از میان فلز مذاب و پوشان خارج می‌شوند و با هر بار فرار گاز، فشار کاهش پیدا می‌یابد، جبهه‌ی مذاب پیش‌روی کرده و به دیواره‌ی قالب هم‌چون یک پتک ضربه وارد می‌کند. نتیجه‌ی این ضربه‌ها، ایجاد انبساط در قطعه و یا فروریختن ماسه‌ی فشرده به‌داخل حفره‌های مدل می‌باشد [1,5,7,8].

کیفیّت سطحی پوشان بر روی مدل‌ها کنترل کننده‌ی بسیاری از عیب‌ها می‌باشد. سطح پوشان باید بدون ترک باشد، از این رو عوامل مؤثر بر سیکل خشک شدن پوشان، شامل میزان رطوبت محیط خشک کننده، دما و زمان خشک شدن، در کنترل کیفیّت سطحی پوشان و عیب‌ها اهمیّت دارند [2,9,10].

حفره‌های داخلی یکی از عیب‌های متداول در قطعات ریختگی تولیدی با مدل از بین رونده، به‌خصوص در قطعات چدنی، هستند که یکی از دلایل ایجاد آن‌ها، نفوذپذیری بسیار زیاد پوشان است [7,11,12].

حفره‌های داخلی دارای سطوح صاف و تقریباً کروی هستند که اغلب با سطح قطعه تماسی ندارند. حفره‌های داخلی بزرگ بیش‌تر به‌صورت منفرد و حفره‌های کوچک به‌صورت تجمعی و با اندازه‌های مختلف می‌باشند. این حفره‌ها در ریخته‌گری با مدل از بین رونده در نتیجه‌ی به دام افتادن قطره‌های مذاب مواد حاصل از تجزیه‌ی اسفنج درون فلز مذاب ایجاد می‌شوند. این قطره‌ها با حرارت مذاب تجزیه شده و به گاز تبدیل می‌شوند. سرعت حرکت مذاب تأثیر عمده‌ای بر حفره‌های داخلی دارد. در ریخته‌گری آلومینیم، بهترین سرعت حرکت مذاب ۲/۳–۱/۸ سانتی‌متر بر ثانیه است. اگر سرعت از این بالاتر باشد، حفره‌های داخلی زیادی در قطعه ایجاد خواهند شد [13-15].

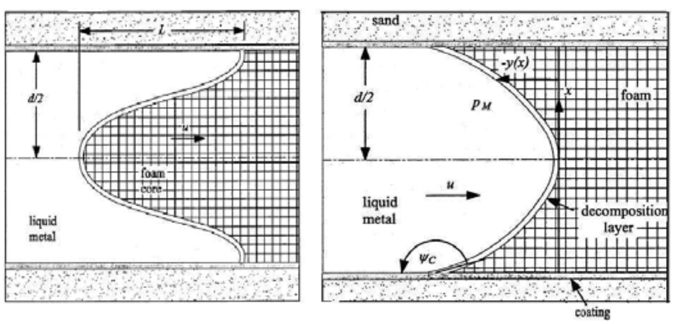
در ریخته‌گری با مدل از بین رونده، دو نوع

جریان محدّب و مقعّر حین حرکت مذاب در مدل اسفنجی اتفاق می‌افتد. عامل اصلی ایجاد حفره در قطعات ریخته‌گری، تغییر شکل جریان مذاب از حالت محدّب به مقعّر در مواجهه با اسفنج است. در شکل‌های (۱و۲)، شکل‌های محدّب و مقعّر جریان مذاب مشاهده می‌شود. با توجه به شکل (۱)، در حالتی که شکل جریان مذاب محدّب باشد و حتی مذاب از دو جهت به‌سمت اسفنج حرکت کند، احتمال ایجاد حفره بسیار کم است [۱٦].

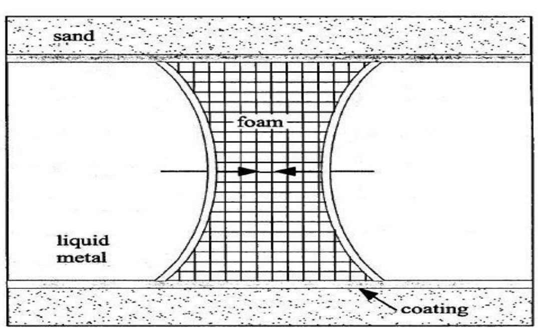
در ریخته‌گری قطعات با مدل از بین رونده، نفوذپذیری پوشان مهم‌ترین عامل در کنترل عیب‌های حفره‌های سطحی و داخلی می‌باشد، به‌گونه‌ای‌که نفوذپذیری کم‌تر از حد بهینه‌ی پوشان، شکل جریان حرکت مذاب در قطعه را محدّب کرده و باعث تجمع گازهای حاصل از تجزیه‌ی اسفنج در فصل مشترک جبهه‌ی مذاب و سطح پوشان می‌شود، و حفره‌های سطحی را حین انجماد قطعه بر روی سطح ایجاد می‌کند. برعکس، اگر نفوذپذیری پوشان از حد بهینه‌ی آن بیش‌تر باشد، سرعت حرکت مذاب در نواحی متّصل به سطح پوشان افزایش یافته و باعث عدم حرکت یکنواخت جبهه‌ی مذاب و تشکیل جریان مقعّر و در نتیجه، حبس محصولات حاصل از تجزیه‌ی اسفنج در مذاب حین انجماد و تشکیل حفره‌های داخلی در قطعه‌ی حاصل خواهد شد [۱٦].

مهم‌ترین علل بروز حفره‌های داخلی در قطعات ریختگی تولید شده به‌روش ریخته‌گری با مدل از بین رونده عبارتند از:

- کم بودن چگالی مدل اسفنجی
- نفوذپذیری زیاد پوشان



شکل ۱ شکل جریان فلز مذاب، محدّب در سمت راست و مقعّر در سمت چپ [۱٦]



شکل ۲ حرکت جریان مذاب از دو سمت به‌طرف اسفنج و ایجاد جریانی به‌شکل محدّب [۱٦]

– ضخامت بسیار کم پوشان

– گرانروی بسیار کم پوشان

– بالا بودن بیش از حد دمای بارریزی

به‌طور کلی، عواملی که سبب افزایش بیش از حد سرعت تجزیه‌ی اسفنج و پر شدن قالب و در نتیجه، تشکیل جریان مقعّر می‌شوند، به دام افتادن قطره‌های مذاب مواد حاصل از تجزیه‌ی اسفنج درون فلز مذاب و در نتیجه، حفره‌های داخلی را افزایش می‌دهند. با کاهش چگالی مدل اسفنجی، سرعت تجزیه‌ی اسفنج و پر شدن قالب و تشکیل جریان مقعّر افزایش یافته و حفره‌های داخلی افزایش می‌یابند [19و١٦].

از آنجا که فشار برگشتی محصولات حاصل از تجزیه‌ی اسفنج یکی از مهم‌ترین عوامل کنترل کننده‌ی سرعت پر شدن قالب در ریخته‌گری با مدل از بین رونده است، افزایش بیش از حد نفوذپذیری پوشان سبب خروج سریع‌تر گازهای حاصل از تجزیه‌ی اسفنج می‌شود و در نتیجه، کاهش این فشار باعث افزایش سرعت حرکت مذاب در نواحی متصّل به سطح پوشان قالب و تشکیل جریان مقعّر و بنابراین، افزایش حفره‌های داخلی قطعه می‌شود [20].

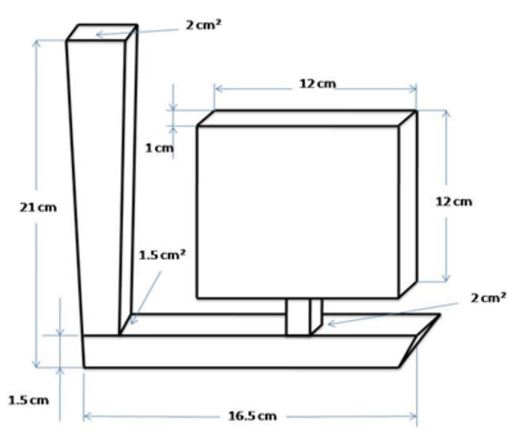
با کاهش ضخامت و گرانروی پوشان، نفوذپذیری آن افزایش می‌یابد و با تشکیل جریان مقعّر، حفره‌های داخلی قطعه را افزایش می‌دهد [20].

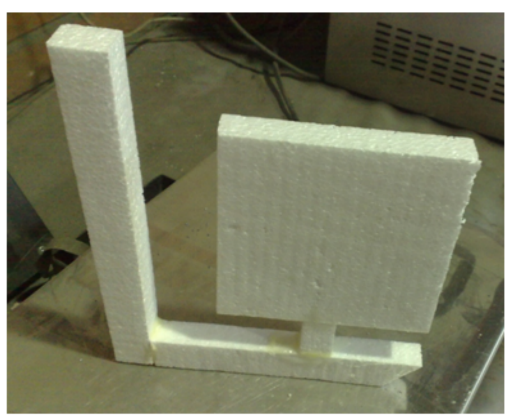
افزایش بیش از حد دمای بارریزی نیز با افزایش سرعت تجزیه‌ی اسفنج و پر شدن قالب و ایجاد جریان مقعّر، حفره‌های داخلی قطعه را افزایش می‌دهد [20].

هدف اصلی از انجام این تحقیق، کنترل دقیق مشخصّات پوشان به‌منظور کمینه کردن عیب حفره‌های داخلی در قطعات می‌باشد.

مواد و روش تحقیق

برای انجام آزمایش‌های مورد نظر در این تحقیق، از یک مدل اسفنجی مطابق با شکل (۳)، استفاده شده است. به‌منظور تهیه‌ی مذاب چدن خاکستری، از یک کوره‌ی القایی بدون هسته با فرکانس شبکه استفاده شد. جدول (۱) محدوده‌ی ترکیب شیمیایی مذاب و ترکیب شیمیایی نمونه‌های ریختگی را نشان می‌دهد. برای قالب‌گیری، از ماسه‌ی خشک و بدون چسب سیلیسی با عدد ریزی دانه‌ی AFS 33-37 استفاده شد. به‌منظور تولید مدل‌های اسفنجی آزمایشی، از دانه‌های اسفنجی کوپلی‌مر خام با مشخصّات فیزیکی ذکر شده در جدول (۲) استفاده شد.





شکل۳ مدل اسفنجی مورد استفاده در آزمایش‌ها

جدول ۱ محدوده‌ی ترکیب شیمیایی مذاب و ترکیب شیمیایی نمونه‌های ریختگی

ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)	C	Si	S	P
دامنه	۳/٤–۳/٦	۲/٥–۲/۷	۰/۰۸–۰/۱۲	۰/۱Max
نمونه	۳/٥۲	۲/٥۷	۰/۰۹	۰/۰۸

جدول۲ مشخصّات دانه‌های اسفنجی کوپلی‌مر مورد استفاده در تولید مدل‌ها

جنس اسفنج	دانه‌بندی اسفنج خام اولیّه	چگالی دانه‌های اسفنجی	میزان مواد فرّار (٪)
کوپلی‌مر	۰/۰۳–۰/۰٥ mm	۰/٥۳–۰/٦٥ gr/lit	≤ ۷/٥

لازم به‌ذکر است که سیکل‌های حرارتی برای عملیات پیش انبساط دانه‌های اسفنجی و پیرسازی مدل‌های اسفنجی برای تمامی نمونه‌های آزمایش یکسان بوده‌اند، و در ادامه به آن‌ها اشاره شده است.

مرحله‌ی پیش انبساط. برای این‌منظور، از یک دستگاه پیش انبساط‌دهنده‌ی آزمایشگاهی استفاده شد. ابتدا ۱٤۰۰ گرم از اسفنج خام مذکور در دستگاه قرار داده شد و انبساط اولیّه با دمش بخار با شرایط زیر انجام شد:

– زمان بخاردهی: ٥۰ تا ٦٤ ثانیه
– فشار بخار: ۰/٥۳ تا ۰/٦۷ اتمسفر
– چگالی دانه‌های پیش منبسط شده: ۲۳ گرم بر لیتر

مرحله‌ی پیرسازی. در این مرحله، دانه‌های اسفنجی حاصل از مرحله‌ی پیش انبساط خشک شدند، و به‌منظور خروج رطوبت و پَنتان باقی‌مانده از ذرات اسفنج و رسیدن به پایداری ابعادی لازم، به‌مدّت ۸ تا ۱۲ ساعت در سیلوهای مخصوص نگه‌داری شدند.

مرحله‌ی ساخت مدل. در این مرحله، اسفنج‌های پیرسازی شده به‌شرح زیر، برای تولید مدل‌های اولیّه برای آزمایش‌ها استفاده شدند.

– بستن قالب‌های آلومینیمی مخصوص با هواکش‌های دمشی کافی در سطوح آن
– شستن قالب با بخار آب به‌منظور بررسی باز بودن هواکش‌ها
– بررسی بیرون اندازها (سیستم مکشی برای بیرون آوردن مدل‌های تولیدی از قالب)
– تزریق میزان معیّنی از دانه‌های اسفنج منبسط و پیرسازی شده به قالب
– تزریق بخار با فشار و دمای معیّن به قالب
– تزریق آب سرد برای خودگیری مدل اسفنجی و سادگی خروج آن
– باز کردن لنگه‌های قالب و بیرون آوردن مدل به‌کمک سیستم مکشی

پوشان‌دهی. در این مرحله، مدل‌های تولیدی با دو نوع پوشان خارجی با مشخصّاتی که در ادامه می‌آید، به‌روش غوطه‌وری و مطابق با مشخصّات مندرج در جدول (۳)، پوشان‌دهی شدند. مشخصّات و سطوح مورد بررسی از پوشان به‌عنوان اطّلاعات ورودی در نرم‌افزار Design-Expert7 استفاده شدند، و طرّاحی آزمایش‌ها به‌کمک این نرم‌افزار انجام گرفت.

پوشان A:

– پوشان دیرگداز پایه آب (water based) دیرگداز برای ریخته‌گری چدن
– ٥٤ تا ٥۷/٥ درصد وزنی فاز جامد
– چگالی g/cm^3 ۱/٤٥–۱/٦۰ در دمای $°C$ ۲۰
– درجه‌ی اسیدی (PH) برابر با ۷/٥

پوشان B:

– پوشان دیرگداز آب پایه برای ریخته‌گری چدن
– ۵۸ درصد وزنی فاز جامد
– چگالی $1/55\ g/cm^3$ در دمای ۲۰ °C
– درجه‌ی اسیدی (PH) برابر با ۹/٤

در مرحله‌ی بعدی، مدل‌های پوشان‌دهی شده پس از خشک شدن، مطابق با شرایط ذکر شده در جدول (٦) به‌مرحله‌ی قالب‌گیری و ریخته‌گری ارسال شد، و عملیات قالب‌گیری و ریخته‌گری مطابق با شرایط ارائه شده در جدول (٤)، انجام گرفت.

قطعات ریختگی پس از مراحل انجماد، تخلیه‌ی قالب، خنک شدن و ساچمه پاشی، به‌منظور تشخیص حضور حفره‌های داخلی به‌روش رادیوگرافی اشعه‌ی X بررسی شدند و به این ترتیب، به چهار دسته‌ی قطعات بدون عیب، با حفره‌های داخلی کم، با حفره‌های داخلی متوسط و با حفرات داخلی زیاد تقسیم‌بندی شدند. در این مرحله، به‌منظور کمّی‌سازی حفره‌های داخلی در قطعات، عددهای ۰، ۲۰، ٤۰ و ٦۰، مطابق با جدول (۵)، در نظر گرفته شدند.

پس از بررسی قطعات ریختگی، عددهای حاصل از نتایج، مطابق با جدول (٦)، در نرم‌افزار فوق‌الذکر استفاده شد، و عملیاتی به‌شرح زیر بر روی آن‌ها انجام شد:

۱– بررسی تأثیر مشخصّات مورد مطالعه بر روی حفره‌های داخلی.
۲– مدل‌سازی مشخصّات و پیش بینی میزان حفره‌ها در شرایط مختلف استفاده از آن‌ها و رسم نمودارهای دوبعدی و سه بعدی مدل حاصل.
۳– بهینه‌سازی مشخصّات مورد مطالعه به‌منظور کمینه کردن تعداد حفره‌ها و رسم نمودارهای سه بعدی در حالت بهینه.

نتایج و بحث

شکل (٤) نمونه‌هایی از تصاویر رادیوگرافی اشعه‌ی X مربوط به حفره‌های داخلی در قطعات مورد آزمایش را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، میزان حفره‌های داخلی در قطعات متفاوتند.

در شکل (۵) (نمودار پارِتو)، اثر هر کدام از مشخصّات پوشان بر روی حفره‌های داخلی نشان داده شده است. در این شکل، B ضخامت پوشان، C گران‌روی پوشان، A دمای خشک شدن و D زمان خشک شدن هستند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، از میان این مشخصّات، ضخامت پوشان (B) بیش‌ترین و مدّت زمان نگه‌داری در کوره‌ی خشک‌کن (D) کم‌ترین تأثیر را بر روی عیب مذکور دارند.

آنالیز واریانس مطابق با شکل (٦) وبه‌منظور مدل‌سازی، بر روی داده‌ها انجام گرفت.

نتایج حاصل از آنالیز واریانس، تأثیر متقابل دمای کوره و زمان نگه‌داری مدل‌های پوشان‌دهی شده در آن (AD) و ضخامت پوشان و زمان نگه‌داری مدل‌های پوشان‌دهی شده در کوره‌ی خشک‌کن (BC) را نشان می‌دهند.

جدول ۳ مشخصّات و سطوح مورد بررسی پوشان

مشخصّات	نوع پوشان	ضخامت پوشان (تعداد لایه‌ی پوشان بر روی اسفنج)	گران‌روی پوشان (ثانیه)	دمای کوره‌ی خشک‌کن (°C)	زمان نگه‌داری در کوره‌ی خشک‌کن (ساعت)
سطوح	B و A	۳،۱	۹ ،۱۳	٤۰، ٦۰	۱/۵ ،۲/۵
نقاط مرکزی سطوح	–	۲	۱۱	۵۰	۲

جدول ٤ شرایط قالب‌گیری و ریخته‌گری مدل‌های پوشان‌دهی شده

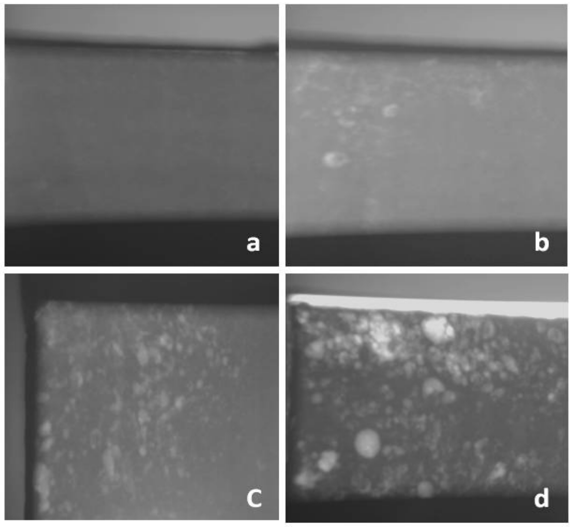
مدّت ارتعاش (ثانیه)	میزان ارتعاش (گرم)	نوع ارتعاش اعمالی	میزان خلاء اعمالی (اتمسفر)	دمای ذوب‌ریزی (°C)
٣٠-٤٥	١/٢	افقی	-٠/٥	١٤٢٠ ± ٥

جدول ٥ کمّی‌سازی حفره‌های داخلی در قطعات مورد آزمایش

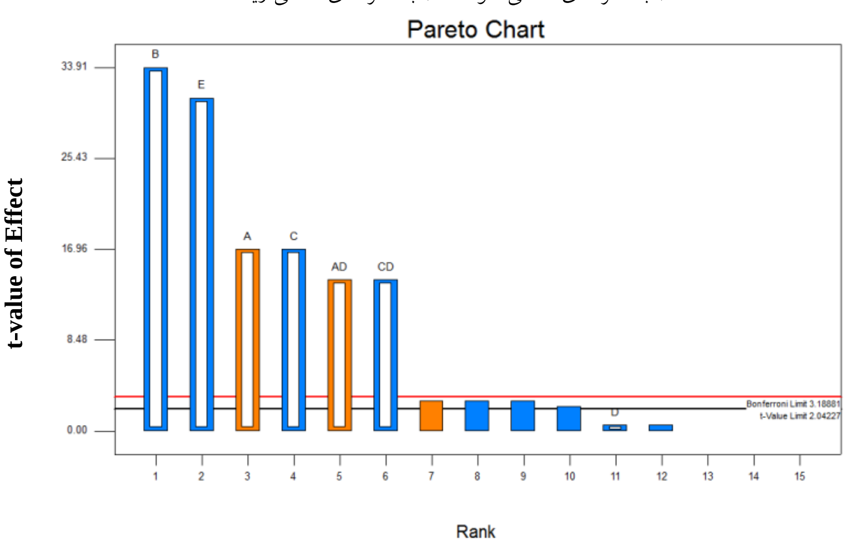
٦٠	٤٠	٢٠	٠
حفرات داخلی شدید	حفرات داخلی متوسط	حفرات داخلی جزئی	بدون عیب

جدول ٦ طرّاحی آزمایش‌های انجام شده و نتایج حاصل از آن‌ها توسط نرم‌افزار Design-Expert7 به‌روش 2-Level Factorial با ٨ نقطه‌ی مرکزی، ٢ تکرار و سطح اعتماد ٩٥ درصد

حفره‌های داخلی	نوع پوشان	زمان خشک شدن (ساعت)	گران‌روی پوشان (ثانیه)	ضخامت پوشان (تعداد لایه)	دمای خشک شدن (°C)	شماره‌ی آزمایش
٢٠	B	٢	١١	٢	٥٠	١
٢٠	B	١/٥	٩	٣	٦٠	٢
٤٠	A	١/٥	١٣	٣	٦٠	٣
٦٠	A	١/٥	٩	٣	٦٠	٤
٤٠	A	١/٥	٩	٣	٤٠	٥
٠	A	٢/٥	١٣	٣	٤٠	٦
٤٠	A	٢	١١	٢	٥٠	٧
٠	A	٢/٥	١٣	٣	٤٠	٨
٢٠	B	٢/٥	١٣	١	٤٠	٩
٦٠	A	١/٥	٩	١	٦٠	١٠
٦٠	A	١/٥	١٣	١	٤٠	١١
٢٠	B	٢	١١	٢	٥٠	١٢
٠	B	١/٥	١٣	٣	٤٠	١٣
٦٠	A	٢/٥	١٣	١	٦٠	١٤
٦٠	B	٢/٥	٩	١	٦٠	١٥
٦٠	A	١/٥	١٣	١	٤٠	١٦
٤٠	B	١/٥	١٣	١	٦٠	١٧
٢٠	B	٢	١١	٢	٥٠	١٨
٢٠	B	٢	١١	٢	٥٠	١٩
٠	B	١/٥	١٣	٣	٤٠	٢٠
٦٠	B	٢/٥	٩	١	٦٠	٢١
٦٠	A	٢/٥	١٣	١	٦٠	٢٢
٦٠	A	٢/٥	٩	٣	٦٠	٢٣
٦٠	A	٢/٥	٩	١	٤٠	٢٤
٤٠	B	١/٥	١٣	١	٦٠	٢٥
٤٠	B	١/٥	٩	١	٤٠	٢٦
٢٠	B	١/٥	٩	٣	٦٠	٢٧
٦٠	A	٢/٥	٩	١	٤٠	٢٨
٠	B	٢/٥	١٣	٣	٦٠	٢٩
٤٠	B	١/٥	٩	١	٤٠	٣٠
٠	B	٢/٥	٩	٣	٤٠	٣١
٠	B	٢/٥	١٣	٣	٦٠	٣٢
٤٠	A	١/٥	٩	٣	٤٠	٣٣
٦٠	A	٢/٥	٩	٣	٦٠	٣٤
٤٠	A	٢	١١	٢	٥٠	٣٥
٤٠	A	٢	١١	٢	٥٠	٣٦
٢٠	B	٢/٥	١٣	١	٤٠	٣٧
٠	B	٢/٥	٩	٣	٤٠	٣٨
٤٠	A	١/٥	١٣	٣	٦٠	٣٩
٤٠	A	٢	١١	٢	٥٠	٤٠



شکل ٤ تصویرهایی از حفره‌های داخلی در قطعات مورد آزمایش؛ a) قطعه‌ی بدون عیب، b) با حفره‌های داخلی کم، c) با حفره‌های داخلی متوسط d) با حفره‌های داخلی زیاد



شکل ۵ نمودار پارِتو نشان‌دهنده‌ی تأثیر هر یک از مشخصّات پوشان بر روی حفره‌های داخلی

مدل‌های به‌دست آمده از آنالیز آنُـوا (ANOVA) انجـام شده بر روی داده‌ها عبارتند از:

برای پوشان A:

$$(I+0.6)^{1.65}=981.99840-25.38828*(T)-727.25114*(th)+126.94141*(V)+83.68958*(t)+18.14852*(T*t)-90.74262*(V*t) \quad (۱)$$

و برای پوشان B:

$$(I+0.6)^{1.65}=582.33781-25.38828*(T)-727.25114*(th)+126.94141*(V)+83.68958*(t)+18.14852*(T*t)-90.74262*(V*t) \quad (۲)$$

در این رابطه‌ها، I حفره‌های داخلی، T دمای کوره‌ی خشک کن، t زمان نگه‌داری مدل‌های پوشان‌دهی شده در کوره‌ی خشک کن، t_h ضخامت پوشان بر روی مدل‌های اسفنجی، و V گرانروی

پوشان می‌باشند.

اثر نوع پوشان. شکل (۷) نمودار نوع پوشان بر حسب حفره‌های داخلی حاصل از مدل را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل (۷) مشاهده می‌شود، میزان حفره‌های داخلی در پوشان A همواره بیش از پوشان B می‌باشد، و این به‌دلیل نفوذپذیری بیش‌تر آن نسبت به پوشان B می‌باشد.

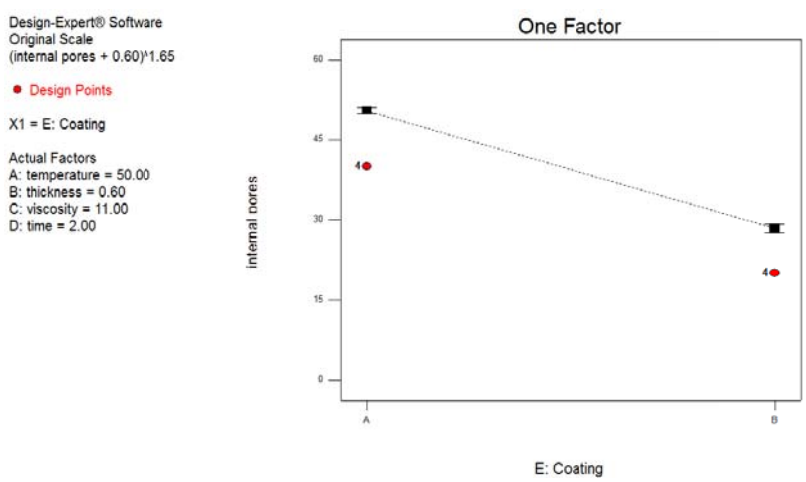
Response 8 internal pores
Transform: Power Lambda: 1.65 Constant: 0.6
Hierarchical Terms Added after Manual Regression
D

ANOVA for selected factorial model
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	4.260E+006	7	6.085E+005	459.47	< 0.0001	significant
A-temperature	*3.808E+005*	*1*	*3.808E+005*	*287.52*	*< 0.0001*	
B-thickness	*1.523E+006*	*1*	*1.523E+006*	*1150.10*	*< 0.0001*	
C-viscosity	*3.808E+005*	*1*	*3.808E+005*	*287.52*	*< 0.0001*	
D-time	*397.96*	*1*	*397.96*	*0.30*	*0.5876*	
E-Coating	*1.278E+006*	*1*	*1.278E+006*	*964.82*	*< 0.0001*	
AD	*2.635E+005*	*1*	*2.635E+005*	*198.95*	*< 0.0001*	
CD	*2.635E+005*	*1*	*2.635E+005*	*198.95*	*< 0.0001*	
Curvature	1.778E+005	2	88892.18	67.12	< 0.0001	significant
Residual	39732.73	30	1324.42			
Lack of Fit	*39732.73*	*8*	*4966.59*			
Pure Error	*0.000*	*22*	*0.000*			
Cor Total	4.477E+006	39				

The Model F-value of 459.47 implies the model is significant. There is only a 0.01% chance that a "Model F-Value" this large could occur due to noise.

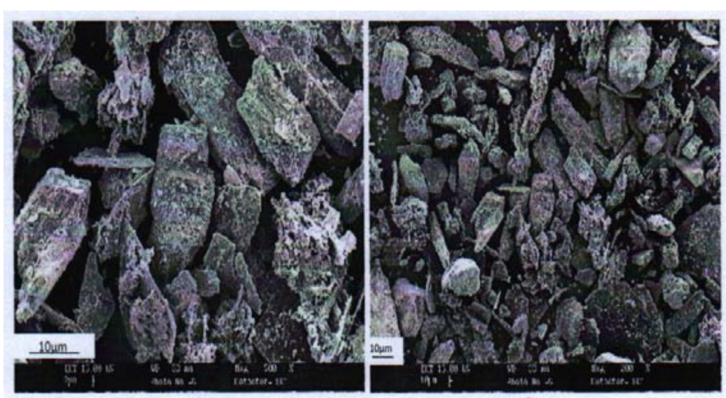
شکل ٦ آنالیز واریانس انجام شده بر روی داده‌ها توسط نرم‌افزار Design-Expert7



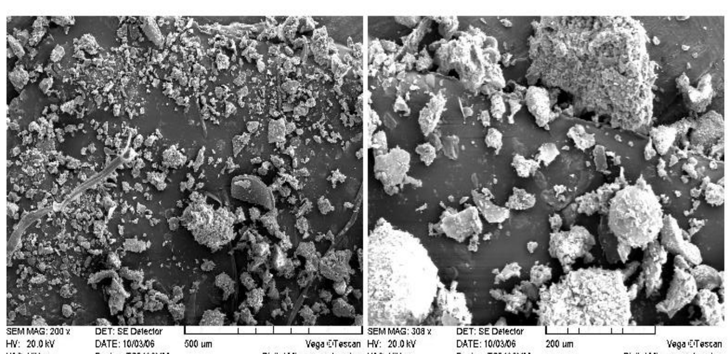
شکل ۷ نمودار نوع پوشان بر حسب حفره‌های داخلی

شکل‌های (۸ و ۹) تصویرهای SEM از پوشان‌های A و B را نشان می‌دهند. همان‌طور که در این تصویرها مشاهده می‌شود، علّت نفوذپذیری کم‌تر پوشان B نسبت به نوع A وجود درصد بالایی از ذرات ریز در آن و در نتیجه، مسدود شدن حفره‌های بین ذرات درشت می‌باشد. نفوذپذیری زیاد پوشان A سبب افزایش سرعت خروج گازهای حاصل از تجزیه‌ی اسفنج شده و با تشکیل جریان مقعّر در مذاب، باعث به‌دام افتادن بیش‌تر مواد مذاب حاصل از تجزیه‌ی اسفنج در مذاب می‌شود و به این ترتیب، حفره‌های داخلی افزایش می‌یابند.

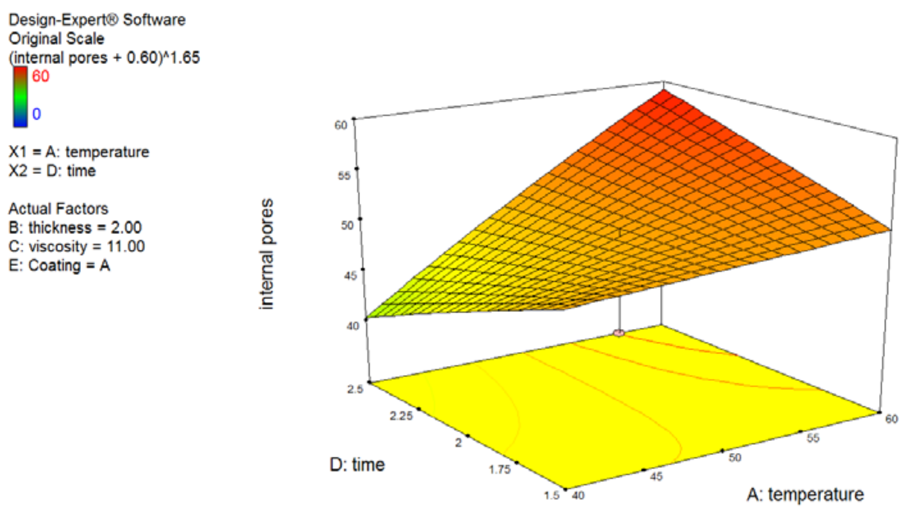
تأثیر متقابل دما و زمان خشک شدن. شکل‌های (۱۰ و ۱۱) نمودارهای تأثیر متقابل دما و زمان خشک شدن را بر حفره‌های داخلی نشان می‌دهند. مطابق با این نمودارها، حفره‌های داخلی در زمان‌های کم خشک شدن (۱/۵ ساعت) با افزایش دمای کوره به‌مقدار جزئی افزایش می‌یابند، زیرا افزایش دمای خشک شدن سبب ترک‌خوردگی سطح پوشان ناشی از افزایش سرعت تبخیر رطوبت آن و بیش‌تر شدن فشار بخار حاصل از آن می‌شود. ترک‌های حاصل با افزایش نفوذپذیری و در نتیجه، با تشکیل جریان مقعّر مذاب در قالب سبب به‌دام افتادن بیش‌تر مواد مذاب حاصل از تجزیه‌ی اسفنج در مذاب و افزایش حفرات داخلی می‌شوند. از طرف دیگر، ملاحظه می‌شود که با افزایش زمان خشک شدن، شدّت افزایش حفره‌های داخلی بیش‌تر می‌شود، زیرا با افزایش زمان خشک شدن تعداد ترک‌های ناشی از افزایش دمای خشک‌شدن بیش‌تر می‌شود، و این سبب افزایش شدیدتر تعداد حفره‌های داخلی می‌شود.



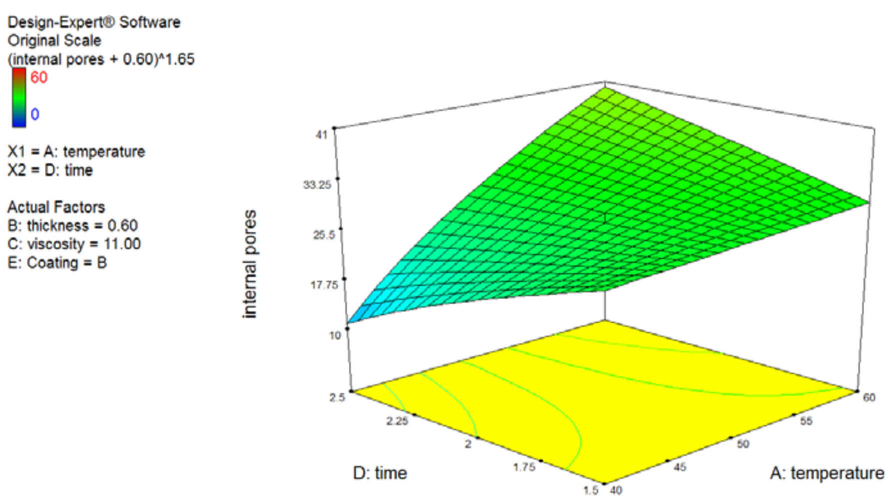
شکل ۸ تصویر SEM از ذرات جامد پوشان A پس از عملیات حرارتی در دمای ۷۰۰ °C [۱٦].



شکل ۹ تصویر SEM از ذرات جامد پوشان B پس از عملیات حرارتی در دمای ۷۰۰ °C [۱٦]



شکل ۱۰ نمودار تأثیر متقابل دما و زمان خشک شدن پوشان A بر حسب حفره‌های داخلی

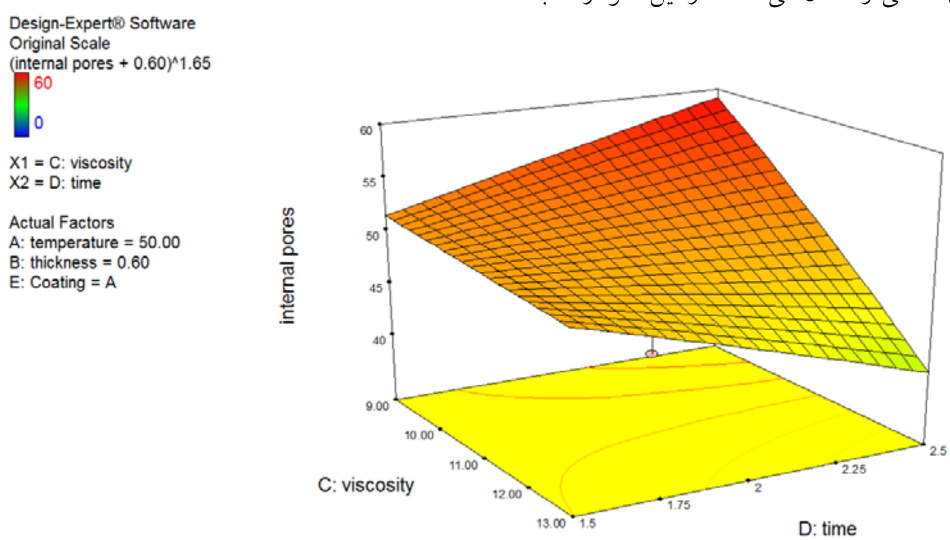


شکل ۱۱ نمودار تأثیر متقابل دما و زمان خشک شدن پوشان B بر حسب حفره‌های داخلی

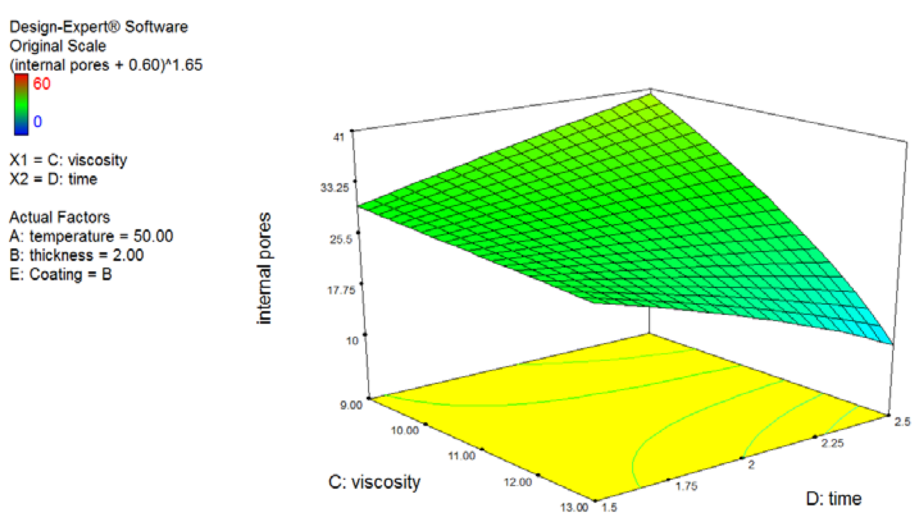
افزون بر این، ملاحظه می‌شود که در دماهای بالای خشک شدن (٦٠ °C) و با افزایش زمان خشک شدن، حفره‌های داخلی افزایش می یابند، در حالی‌که در دماهای پایین خشک شدن (٤٠ °C) و با افزایش زمان خشک شدن، حفره‌های داخلی کاهش می‌یابند، زیرا در دماهای پایین خشک شدن و به‌دلیل سرعت کم تبخیر پوشان، افزایش زمان خشک شدن بدون ایجاد ترک‌خوردگی در سطح پوشان سبب خشک شدن کامل آن می‌شود. در صورتی‌که زمان خشک شدن کم باشد، پوشان کاملاً خشک نشده و رطوبتِ آن در مرحله‌ی ریخته‌گری و به‌دلیل دمای بسیار بالای مذاب، به‌شدّت تبخیر می‌شود و به این ترتیب، فشار بخار بالای آن سبب ترک‌خوردگی سطح پوشان شده و با افزایش نفوذپذیری پوشان و در نتیجه، تشکیل جریان مقعّر در

قالب، حفره‌های داخلی افزایش می‌یابند.

تأثیر متقابل گران‌روی پوشان و زمان خشک شدن. شکل‌های (۱۲ و۱۳) نمودارهای تأثیر متقابل زمان خشک شدن و گران‌روی پوشان‌های A و B بر حسب حفره‌های داخلی را نشان می‌دهند. در این نمودارها، با افزایش گران‌روی پوشان، حفره‌های داخلی کاهش می‌یابند، زیرا با افزایش گران‌روی، نفوذپذیری پوشان کاهش می‌یابد که نتیجه‌ی آن، تشکیل جریان محدّب در قالب و در نتیجه، کاهش تعداد حفره‌های داخلی می‌باشد.



شکل ۱۲ نمودار زمان خشک شدن و گران‌روی پوشان A بر حسب حفره‌های داخلی

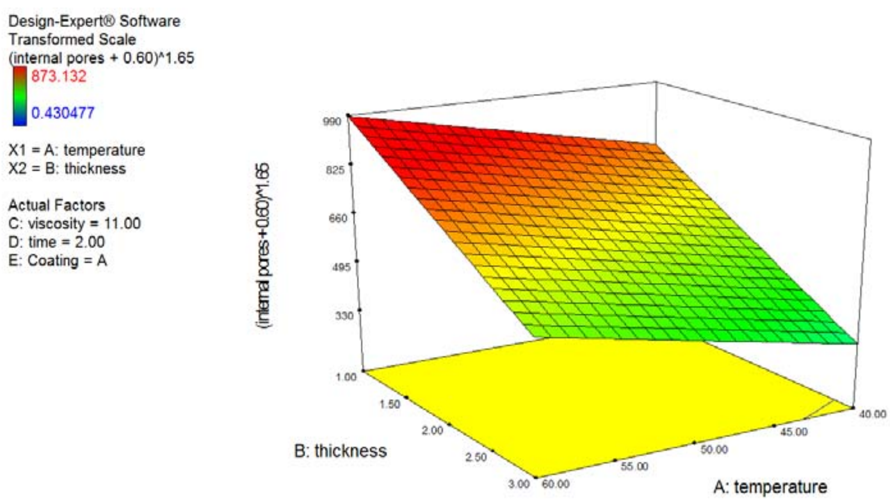


شکل ۱۳ نمودار زمان خشک شدن و گران‌روی پوشان B بر حسب حفره‌های داخلی

افزون بر این، ملاحظه می‌شود که در گران‌روی بیشینه، حفره‌های داخلی با کاهش زمان خشک‌شدن افزایش می‌یابند، زیرا رطوبت باقی‌مانده در پوشان افزایش می‌یابد، و این رطوبت در مرحله‌ی ریخته‌گری و در دمای بسیار بالای مذاب و حضور ترک‌های، سبب افزایش حفره‌های داخلی می‌شود. از طرف دیگر، در گران‌روی کمینه و با افزایش زمان خشک شدن، حفره‌های داخلی افزایش می‌یابند. این به‌دلیل آن است که در این حالت، ترک‌خوردگی‌های سطح پوشان ناشی از دمای بالای خشک شدن افزایش می‌یابد و با افزایش نفوذپذیری آن، جریان مقعّر در قالب تشکیل شده و حفره‌های داخلی افزایش می‌یابند

تأثیر ضخامت پوشان. شکل‌های (١٤ و ١٥) تأثیر ضخامت پوشان را بر دمای خشک شدن نشان می‌دهند. در این نمودارهای، حفره‌های داخلی با افزایش ضخامت پوشان به‌شدّت کاهش یافته‌اند، زیرا افزایش ضخامت پوشان نفوذپذیری پوشان را کاهش می‌دهد و در نتیجه، جریان محدّب تشکیل شده و این باعث کاهش تعداد حفره‌های داخلی می‌شود.

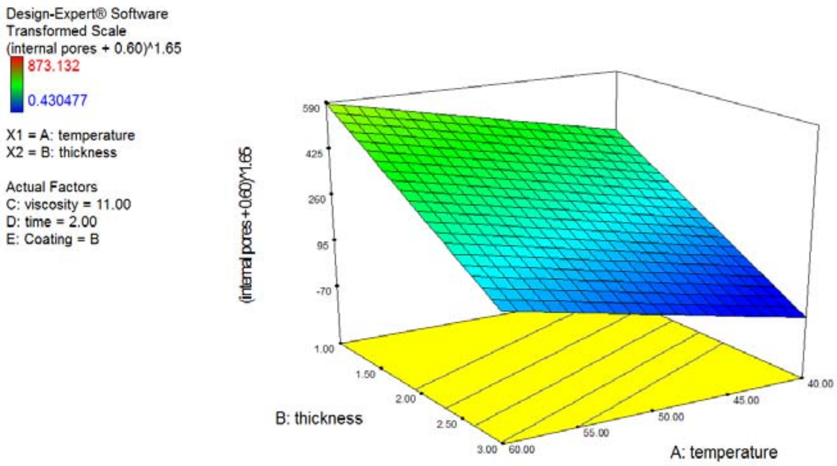
بهینه‌سازی داده‌ها. هدف از بهینه‌سازی، کمینه کردن تعداد حفره‌های داخلی در قطعات می‌باشد. جدول ٧ بهینه‌سازی انجام گرفته توسط نرم افزار را نشان می‌دهد. در شکل‌های (١٦ تا ١٨)، نمودارهای سه بعدی حالت بهینه نشان داده شده‌اند.



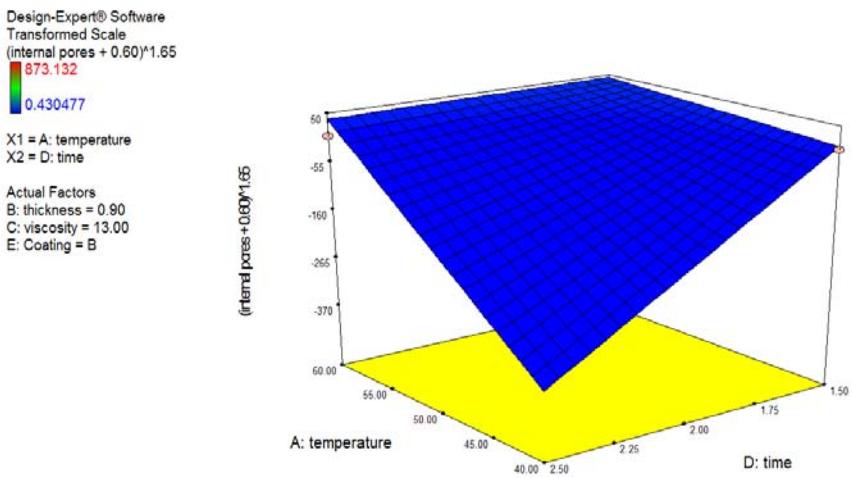
شکل ١٤ نمودار تأثیر دمای خشک شدن و ضخامت پوشان A بر حسب حفره‌های داخلی

جدول ٧ مشخصّات عددی در حالت بهینه

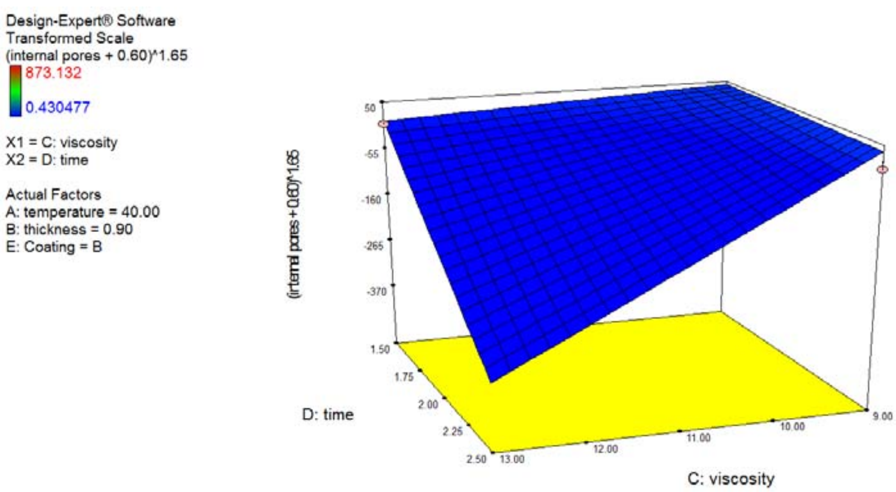
میزان حفره‌های داخلی	نوع پوشان	زمان خشک شدن (ساعت)	گران‌روی پوشان (ثانیه)	ضخامت پوشان (تعداد لایه‌ی پوشان بر روی اسفنج)	دمای خشک شدن (°C)
٠	B	٢/٥	١٣	٣	٤٠



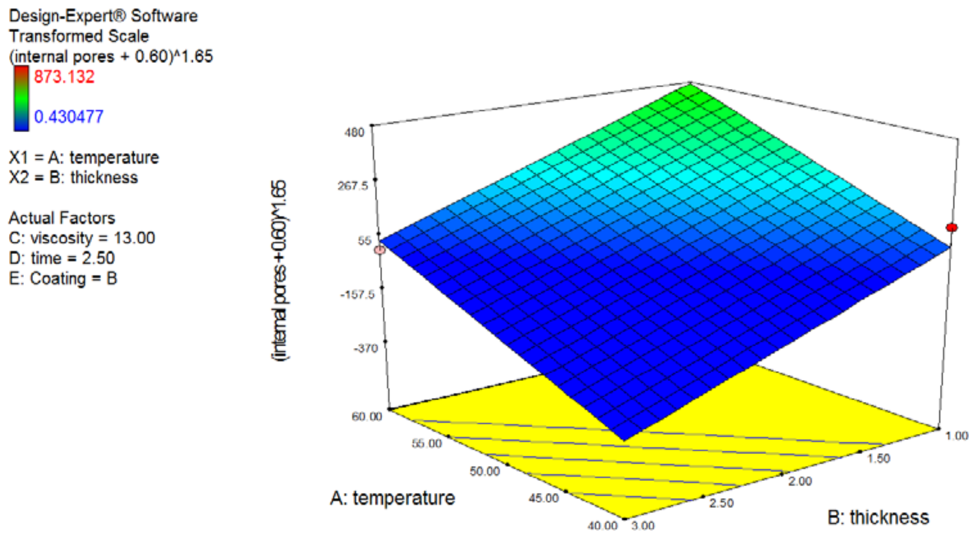
شکل ۱۵ نمودار تأثیر دمای خشک شدن و ضخامت پوشان B بر حسب حفره‌های داخلی



شکل ١٦ نمودار دما و زمان خشک شدن بر حسب حفره‌های داخلی در حالت بهینه



شکل ۱۷ نمودار زمان خشک شدن و گران‌روی پوشان بر حسب حفره‌های داخلی در حالت بهینه



شکل ۱۸ نمودار دمای خشک شدن و ضخامت پوشان بر حسب حفره‌های داخلی در حالت بهینه

نتیجه‌گیری

۱) از بین مشخصّات مورد بررسی، ضخامت پوشان (B) بیش‌ترین و مدّت زمان نگه‌داری در کوره‌ی خشک کن (D) کم‌ترین تأثیر را بر روی حفره‌ها داشتند.

۲) میزان حفره‌های داخلی در پوشان A همواره بیش‌تر از پوشان B به‌دست آمدند.

۳) با افزایش دمای کوره، حفره‌های داخلی افزایش یافتند، و با افزایش گران‌روی و ضخامت پوشان، حفره‌های داخلی کاهش یافتند.

٤) در دماهای بالای خشک شدن (٦٠ °C) و با افزایش زمان خشک شدن، حفره‌های داخلی افزایش یافتند، در حالی‌که در دماهای پایین خشک شدن (٤٠ °C)، حفره‌های داخلی با افزایش زمان خشک شدن کاهش یافتند.

٥) در گران‌روی بیشینه، حفره‌های داخلی با کاهش زمان خشک شدن افزایش یافتند، امّا در گران‌روی کمینه، حفره‌های داخلی با افزایش زمان خشک شدن افزایش یافتند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از زحمات بی‌دریغ پرسنل زحمت‌کش شرکت ریخته‌گری تراکتورسازی تبریز، به‌ویژه جناب آقای مهندس خالیچی، کمال تشکّر و قدردانی را معمول می‌دارند.

مراجع

1. H. Littleton, B. Miller, D. Sheldon, C. Bates, "Lost foam casting-Process control the precision", AFS Trans., Vol. 104, pp.335- 346, (1996).

2. F. Sonnenberg, "Lost Foam Casting Made Simple", AFS, pp. 123-130, (2009).

3. S. Kumar, P. Kumar, H. S. Shan, "Effect of evaporative pattern casting process parameters on the

surface roughness of Al-7% Si alloy casting", *J. Material Process Technology*, pp. 615-620, (2007).

4. S. Bakhtiyarov, L. Overfelt, R. A, "Rheology of refractory coating materials used in the lost foam casting process", *J. Elastomers and Plastics*, Vol.32, pp. 73-85, (2000).
5. G. H. Kocan, "Incorporating permeability into lost foam coating controls", *J.AFS Transactions.96-99*, pp.565-569.
6. W. A, Marchisin, "Refractory coating selection and control for the lost foam casting process", AFS Trans. 2001, pp. 65.
7. R. A. Bambauer, T. Lee, T. Delong, "Effect of continuous mixing on viscosity and permeability of an iron lost foam coating ; a joint study", *J.AFS Transaction 96-123*, pp. 329- 333.
8. Q. H. Zhao, S. Wang Biederman, J. S. Jason, D. Parish, "Lost Foam Casting Coating Characterization: Heat and Mass Transfer", AFS Transactions, pp. 1-15, (2005).
9. J. J. Green, C.W. Ramsay, D. R. Askeland, "Formation of surface defects in gray iron lost foam casting", *J.AFS, Transactions.96-93*, pp. 281-289.
10. J. S. Parish, D. J. Jason, J. L. Meloni, "Practical Control Of Lost Foam Coatings In Foundry Operations", AFS Transactions, pp. 1-8, (2003).
11. R. Venkataramani, C. Ravindran, "Effect of coating thickness and pouring temperature on thermal response in lost foam casting ", *J.AFS*, transactions.96-93, pp. 281-289.
12. M.W. Hill, "Effects of Silicon Content, Coating material and Gating Design on Casting Lost Foam Casting Defect in the Aluminium", AFS Research, pp.443-449.
13. M. W. Hill, "Effects of Silicon Content, Coating material and Gating Design on Casting Lost Foam Casting Defect in the Aluminium", AFS Research, pp.443-449.
14. S. Bennett, C. W. Ramsay, D. R. Askeland, "Termperature gradients during fill and solidification of Al LFCs", AFS. Transaction, 1998, PP. 113.
15. S. Shikumar, X. Yao, M. Makhlouf, "Polymer- melt interactions during casting formation in the lost foam process", *J. Scripta Metallurgica et Materialia*, Vol. 33, PP. 30-46, (1995).

۱۶. اکبرزاده ندافی یاسر، " بررسی علل بروز عیوب کربنی در قطعات ریخته چدنی تولیدی به روش لاست اسفنج و ارائه راه حل آن"، پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی سهند، زمستان (۱۳۸۵).

17. W. Raymond, W. Monrore, "Expendable pattern casting", American Foundry men's Society, Inc. Des Plaines, IL, USA, (1992).
18. A. J. Clegg, "Expanded polystyrene molding", Foundry trade journal, PP. 177-187, (1985).
19. M. Sands, S. Shivkumar, "EPS molecular weight and foam density effects in the lost foam process", *Journal of materials science*, 38, PP. 2233-2239, (2003).

20. G. V. Walford, R. B. Michaels, "Density and Bead Fusion Measurements for Inspection of Lost foam patterns", AFS Trans. Vol. 94, pp 201-205, (2000).